

融合贴近摄影和LiDAR技术的危岩体三维模型构建及稳定性分析

成书楼, 张 鹏, 黄波林, 王 勋, 许凯凯, 董星辰

Construction of three-dimensional model and stability analysis of dangerous rock mass based on nap-of-the-object photogrammetry and LiDAR technology

CHENG Shulou, ZHANG Peng, HUANG Bolin, WANG Xun, XU Kaikai, and DONG Xingchen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124–132

基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法

Stability assessment methods for huge high–steep unstable rock mass based on damage theory

贺凯, 高杨, 殷跃平, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 82–89

无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用

Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope

黄海宁, 黄健, 周春宏, 潘勇杰 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 149–155

川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan–Tibet Railway

周洪福, 冯治国, 石胜伟, 王保弟, 徐如阁, 冉涛 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 112–119

基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析

An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory

鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 112–118

基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three–dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171–179



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305050

成书楼, 张鹏, 黄波林, 等. 融合贴近摄影和 LiDAR 技术的危岩体三维模型构建及稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 172-181.

CHENG Shulou, ZHANG Peng, HUANG Bolin, et al. Construction of three-dimensional model and stability analysis of dangerous rock mass based on nap-of-the-object photogrammetry and LiDAR technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 172-181.

融合贴近摄影和 LiDAR 技术的危岩体三维模型 构建及稳定性分析

成书楼^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 黄波林^{1,2}, 王 勋^{1,2,3}, 许凯凯^{1,2}, 董星辰^{1,2}

(1. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 重庆市地质矿产勘查开发局 107 地质队, 重庆 401120)

摘要: 高陡危岩崩塌是我国山区常见的一种地质灾害, 但由于通行困难等客观因素的限制, 导致人工地质勘查工作效率低, 安全风险高, 存在调查死角。以三峡库区老鼠错 3 号高陡危岩体为例, 融合无人机贴近摄影测量和机载 LiDAR 技术, 建立了高陡危岩体调查分析方法体系。在此基础上, 系统构建了老鼠错 3 号危岩体的三维地质模型, 获取了该危岩体工程地质特征。研究显示老鼠错 3 号危岩体发育有 5 条控制结构面, 软弱层最宽 27.30 m, 凹腔最深 2.19 m, 崩塌类型为倾倒式崩塌; 危岩体稳定性系数在自然工况下为 1.375, 处于稳定状态, 暴雨工况下为 1.01, 处于欠稳定状态, 需进行治疗。结果表明融合贴近摄影和 LiDAR 技术方法对高陡危岩体调查具有较好的互补性, 可为高陡危岩体的非接触式测量、地质信息获取及稳定性分析提供一种新的调查思路, 为库区的防灾减灾工作提供一定的技术支撑。

关键词: 低空遥感; 贴近摄影测量; 激光雷达测量; 危岩体; 稳定性

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0172-10

Construction of three-dimensional model and stability analysis of dangerous rock mass based on nap-of-the-object photogrammetry and LiDAR technology

CHENG Shulou^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, HUANG Bolin^{1,2}, WANG Xun^{1,2,3}, XU Kaikai^{1,2}, DONG Xingchen^{1,2}

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. No.107 Geological Party, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chongqing 401120, China)

Abstract: The collapse of high-steep dangerous rock is a common geological disaster in the mountainous areas of China. However, due to the limitation of objective factors such as traffic difficulties, the efficiency of artificial geological exploration is low and the safety risk is high, and the investigation in some places is unreachable. Based

收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2023-09-03

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A2045); 重庆市规划和自然资源局科研项目(KJ-2023046)

第一作者: 成书楼(2000—), 男, 硕士, 主要从事地质灾害防治及遥感识别方面的研究。E-mail: 2533201934@qq.com

通讯作者: 张鹏(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害成灾机理与遥感识别方面的研究。E-mail: pzhang@ctgu.edu.cn

on the Laoshucuo 3# high-steep dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area, this study established an analysis method system of high-steep dangerous rock mass by integrating UAV nap-of-the-object photogrammetry and airborne LiDAR technology. The three-dimensional geological model of Laoshucuo 3# dangerous rock mass was constructed systematically, and the engineering geological characteristics of the dangerous rock mass were characterized. The results show that there are five structural planes in the dangerous rock mass of Laoshucuo 3#, with the widest weak layer of 27.30 m and the deepest cavity of 2.19 m. The collapse type is toppling collapse. The stability coefficient of the dangerous rock mass is 1.375 under the natural condition, which is in a stable state, and 1.01 under the rainstorm condition, which is in an unstable state and needs to be treated. The technical method in this study has good complementarity to the investigation of high-steep dangerous rock mass, providing a new investigation method for non-contact measurement, geological information acquisition, and stability analysis of high-steep dangerous rock mass, and technical support for disaster prevention and mitigation in the reservoir area.

Keywords: low-altitude remote sensing; nap-of-the-object photogrammetry; LiDAR; unstable rock mass; stability

近年来,大型高陡危岩体崩塌灾害频繁发生,并呈现出隐蔽性强、突发性高、破坏力大、灾害链长等特点^[1]。危岩体失稳破坏冲击水体,产生灾难性涌浪,极易造成群死群伤事件^[2]。如2009年6月5日,重庆市武隆区铁矿乡发生高位岩体崩塌,产生的崩塌-碎屑流共造成87人被埋,26人遇难。高陡危岩可达性差、人工调查难度大、调查数据精度低,并存在极大的安全隐患。因此,如何能够更方便和精确地实现高陡峡谷危岩体的调查和危险性判断,已成为地质灾害领域的工作重点和难点。

针对精细化测量的需求,许强等^[3]提出通过光学遥感、合成孔径雷达干涉和无人机摄影测量等多技术融合,构建天-空-地一体化的“三查”体系,开展地质灾害隐患的普查、详查、核查。该综合对地观测技术体系中,无人机贴近摄影测量技术(nap-of-the-object photogrammetry)是由张祖勋院士团队提出,利用无人机贴近摄影对象表面进行距离5~10 m的多角度拍摄,可以获取毫米级超高分辨率影像,高度还原地表的精细化结构^[4-5]。该技术已在地质监测调查等多个行业上进行了应用研究。梁京涛等^[6]以康定县郭达山为例,通过贴近摄影测量技术识别岩体亚厘米级裂缝,总结归纳了基于贴近摄影测量的高位崩塌早期识别的技术方法。姚富潭等^[7]对危岩体进行多角度贴近摄影,构建精细化的三维模型和三维点云,完成优势结构面产状的半自动提取。但对于表面存在茂密植被覆盖的危岩体,仅通过无人机进行表面拍摄无法获取危岩体植被下软弱层、凹腔等参数特征。机载激光雷达测量技术(light laser detection and ranging, LiDAR)是一种新兴的三维地形测量技术^[8],机载LiDAR脉冲

到达地面后会穿过植被缝隙投射到地面,再反射回设备接收器,有效地去除植被影像而真实反映地表的高程起伏状态,呈现被植被覆盖的地质信息细节情况^[9]。Guillaume等^[10]将摄影测量和机载LiDAR技术结合,获取高山处的多分辨率地形模型,并证明其具有较高精度;贾虎军等^[8]将无人机载LiDAR和倾斜摄影技术结合,采用定性和定量相结合的方法开展地质灾害隐患早期识别。上述研究仅基于宏观条件下的大区域山体滑坡进行分析,针对高陡危岩体的应用则具有一定局限性,且缺少针对微形态的工程地质要素提取方法。因此,采用综合遥感手段对高陡危岩体开展非接触性调查,以获取传统调查不易获取的工程地质信息并分析危岩体的稳定性,是亟待解决的关键问题。

以三峡库区巫峡老鼠错3号危岩体为例,利用融合贴近摄影测量技术和LiDAR技术,建立高陡峡谷危岩体调查方法体系,系统构建危岩体三维实景模型、概化模型和LiDAR点云模型。基于三维地质模型,厘定危岩体规模、结构面产状等工程地质特征提取方法,并进行危岩体的稳定性分析,以期为该地区地质灾害调查提供科学有效方法,提升防治减灾能力。

1 融合低空遥感技术的高陡危岩体调查分析方法体系

1.1 基于贴近摄影测量技术的危岩体结构测量

传统的危岩体测量通常使用皮尺、测距仪等工具进行实地勘察,其工作难度和数据误差较大。基于贴近摄影生成的三维实景模型不仅可以精确还原物体表面结构,而且提供了空间坐标信息。通过运用相关软件的量测功能,可以直接计算危岩体的尺寸、裂隙

延伸长度等参数^[11]。将模型进一步解译,可获取岩体结构特征参数,如结构面和裂隙产状、边界条件等。

岩体结构面存在着一定的高低起伏,将结构面沿延伸方向扩展,假定为一个平面。则结构面方程为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

A 、 B 、 C 、 D 为方程参数,且 A 、 B 、 C 不同时为0,则其平面法向量为 $\mathbf{n}(A, B, C)$,通过点云样本选取 $(x_1, y_1, z_1)(x_2, y_2, z_2) \cdots (x_i, y_i, z_i)$,构建偏差平方和方程^[12]:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Ax_i + By_i + Cz_i + D)^2 \quad (2)$$

数据量越多时拟合值越精确,当 S 取最小值时,结构面的拟合程度最高。

通过对 S 求导得到极值点,则当 $\frac{\partial S}{\partial A} = 0$, $\frac{\partial S}{\partial B} = 0$, $\frac{\partial S}{\partial C} = 0$ 时,可求得 A 、 B 、 C 、 D 这4个参数的拟合值,进而推导出系数与结构面走向和倾向之间的关系。

通过计算得出结构面拟合平面的公式,根据平面产状与方程参数之间的对应关系,将产状量化,其中走向为 α ,倾角为 β 。

$$\alpha = \arctan \left| \frac{B}{A} \right| \quad (3)$$

$$\beta = \arctan \left| \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C} \right| \quad (4)$$

根据以上原理,进行Matlab程序编写,输入拟合区域点云样本,即可获得危岩体结构信息。

1.2 基于LiDAR点云的植被覆盖区/岩体软弱层分析

在风化、层间剪切等共同作用下,强度较低的基座岩体易形成节理裂隙。水分进入后岩层软化、崩解,转变为泥质矿物并形成软弱层,为植被的发育创造了条件。隐藏在植被下的软弱层通过常规调查难以被发现,而LiDAR发射的激光脉冲能穿透树林遮挡^[13],对表面的植被点云进行滤波后获取岩体软弱层处的真实信息,以弥补短近摄影测量穿透率低的不足。

选取经典不规则三角网渐进加密算法对LiDAR点云数据进行处理,在危岩体植被茂密处进行纵向截取,提取包含岩体和植被的轮廓信息。再对该截面进行滤波,获取真实的岩体轮廓,利用点云坐标信息,测量软弱层内凹腔的发育宽度及深度。

1.3 调查分析工作流程

融合无人机低空遥感技术的危岩体调查分析工作流程主要包括5部分:作业准备及现场踏勘、贴近摄影测量及野外影像数据采集、三维地质模型建立、

危岩体工程地质特征提取、危岩体稳定性分析等步骤,工作流程如图1所示。

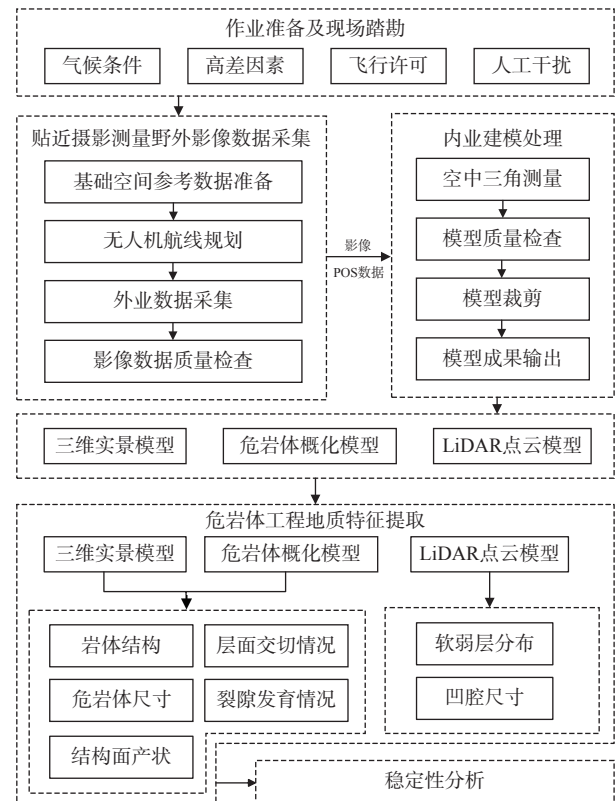


图1 工作流程图

Fig. 1 Flow chart

(1) 作业准备及现场踏勘

在外业航飞之前,需先对测区周围进行踏勘,以评估飞行环境与无人机要求的符合程度。考虑以下要点:①飞行作业应遵循当地的空中管制规定,提前向相关部门申请许可;②确保飞行过程不会对航行船只及周围作业人群造成干扰;③无人机最大飞行航高应大于测区目标的高度;④在风力较弱的情况下进行航测,以降低风速对无人机的干扰。同时,为避免出现阴影和逆光情况,建议在正午前后摄影。

(2) 贴近摄影测量野外数据采集

通常使用公共免费的地形数据,以相对较高的航高来确保无人机飞行安全,规划航线并生成粗略的三维实景模型。在该模型上,选择目标区域的分辨率、航向重叠度和旁向重叠度等摄影测量参数,并计算出摄影测量航点的集合,形成任务航路段。最后,通过起飞点、任务航路段、避障航点和降落点组成无人机贴近摄影测量的航线。完成航线规划后,无人机按照计划航线进行数据采集,然后对图像分辨率进行检查,确保达到要求。

(3) 建立三维地质模型

贴近摄影测量影像数据质量合格后,即开展内业建模工作,包括:三维实景模型、概化模型、LiDAR点云模型。三维实景模型是通过 context capture 软件生成,利用运动恢复结构-多视点匹配(structure from motion-multi view stereo, SFM-MVS)技术实现三维重建。SFM 技术利用多角度的影像数据,计算出所有特征点空间坐标位置,从而生成稀疏点云模型^[14-15]。再通过 MVS 技术将稀疏点云进行稠密匹配,最终输出为密集匹配点云^[16]。利用密集匹配点云计算出不规则三角网,生成三维模型的白膜并将其赋予纹理。将三维实景模型导入 Rhino 软件进行网格编辑,生成概化模型。LiDAR 点云模型则通过无人机载 LiDAR 设备对研究区扫描,在 Li-Acquire 软件中进行解算后得到 las 格式的 point 数据,生成 LiDAR 点云模型。

(4) 危岩体工程地质特征提取

三维地质模型导入 cloud compare 软件后,进行岩体尺寸、裂隙发育、结构面交切和软弱层发育情况等定量化计算。在计算体积时,需利用危岩体的边界条件和结构面特征,从山体中切割开,并假设切割面为后缘断裂面^[17]。由于裂隙本身的弯曲变化,实际中难以进行直接测量。通过多点拟合岩体露头的暴露面迹线,计算出裂隙的贯通深度和张开度等,并以此划分裂隙空间分布关系。岩体的破坏模式受结构面控制,通过最小二乘法拟合平面计算岩体控制结构面的产状,并借助赤平投影图得出结构面的交切关系。植被茂盛的地方通常伴随着软弱层的存在,利用 LiDAR 探测植被下软弱层的分布情况,可以获取岩体的真实轮廓,从而提高危岩体稳定性分析的准确性。

(5) 稳定性分析

通过三维地质模型轮廓和提取的危岩体工程地质特征数据,画出危岩体稳定性计算模式示意图。代入《三峡库区地质灾害防治工程地质勘查技术要求》中的高陡危岩体计算经验公式,计算在自然和暴雨工况下的稳定性系数,并对岩体破坏模式进行分析。

为进一步展示以上危岩体调查分析方法体系的适用性,以老鼠错 3 号危岩体为例开展危岩体三维地质建模研究。

2 典型高陡危岩体三维模型构建

2.1 老鼠错 3 号危岩体概况

老鼠错 3 号危岩位于长江干流巫峡段右侧岸坡上(图 2),行政区划隶属于巫山县巫峡镇跳石村 3 组。

区内地层主要有第四系全新统残坡积(Qh^{el+dl})、崩坡积层(Qh^{col+dl}),二叠系中统茅口组(P_2m)、栖霞组(P_2q),总体地形为北高南低。地貌上属于高山峡谷区,山高谷深,地形陡峭。目标危岩体路段山路崎岖、植被茂盛,人力和勘察设备难以通达。且危岩体前缘存在高陡临空面,角度近直立,人工排查坠落风险大。危岩体上发育多条大型裂缝,人工扰动会加剧危岩体失稳。危岩一旦失稳将直接入江,可能形成涌浪,影响长江航道航运安全,同时威胁神女峰码头(年通过能力达 10 万人次)、神女溪码头(年通过能力达 100 万人次)及两处码头上方居民区百姓生命财产安全。



图 2 老鼠错危岩体地理位置图

Fig. 2 Geographical location of Laoshucuo 3# dangerous rock mass

2.2 无人机数据获取

无人机型号为大疆精灵 Phantom 4 Pro, 水平和垂直精度悬停均为 ± 0.1 m, 配有惯性导航系统、全球卫星导航系统以及 GPS 组合定位系统。相机型号为佳能 5D Mark 4, 像素为 3 040 万, 拍摄图像尺寸为 $4\,864 \times 3\,648$ 。LiDAR 采用 D-LiDAR 200 模块, 测距精度为 ± 1 cm。通过贴近摄影测量拍摄的每一张影像都带有经度、纬度、高程、航向角、俯仰角、翻滚角信息, 以便于 Context Capture 软件对影像进行提取组合。

使用大疆智图进行智能航线规划。以已有地形为基础, 根据危岩体形状特点规划多角度智能航线(图 3), 并将智能航线导入飞控设备, 自动完成对危岩体多角度贴近摄影。航向重叠率 80%, 旁向重叠率约 75%, 贴近距离约 18 m。航线规划完成后, 为确保拍摄安全及拍摄精度, 进行航线检查, 手动设置避障点。

根据研究区的地形地貌特点, 设置 10 个控制点, 其中 6 个用于三维建模, 4 个用于精度检查。采用实时动态差分定位技术(real time kinematic, RTK), 对这些控制点在 CGCS2000 坐标系下进行定点测量。控制点的选择需要在航测区域内均匀分布, 并选择具有明

显标志特征的地面点,以便在后续的建模过程中,能够快速确定像控点的位置,提高建模效率^[18]。

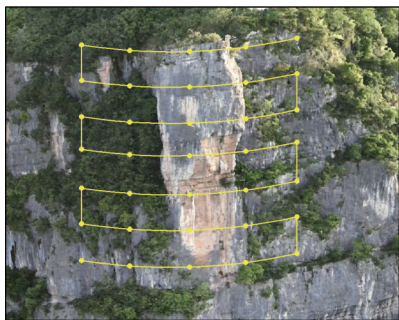


图 3 航线规划示意图

Fig. 3 Route planning schematic diagram

2.3 三维实景模型生成

采用 Context Capture 航测数据处理软件进行航测数据内业处理。首先加载野外采集数据,对影像进行质检。影像携带配套 POS 数据,获取影像的地理位置、姿态等定位辅助信息。相机输出成像时的位置和姿态都是有误差的,空中三角测量进行特征点匹配将不同照片中信息一致的特征点关联,通过调整相机内参、成像时位置和姿态,让特征点在三维空间中相交的误差最小,重新求解和输出相机成像时的位置和姿态参数,排除有缺陷的影像,确保用于三维重建的数据完整正确。共拍摄图像共 399 幅图像,空中三角测量处理后有效图像为 350 幅。

建模前先对数据模型切块,保留危岩主体和基座,去除冗余区域。将模型划分为 24 个瓦片,依次进行建模。经过点云加密算法将稀疏点云再次进行密集匹配,从而获得具有超高精度和密度的密集点云^[19],再将密集点云进行网格化和纹理映射,得到高精度三维实景模型(图 4)。将模型输出为 OBJ 格式后导入 Rhino 软件,转换为可编辑的三角网格面片,生成危岩体概化模型(图 5)。将危岩体中部破碎层面根据出露的迹线进行嵌面,通过渲染模式中材质的改变进行岩体内部可视化研究,可展示岩层的交切关系。

2.4 LiDAR 模型处理

LiDAR 设备安装在无人机上,按照预定航线自动进行扫描,重点探查岩体表面植被茂密的区域。无人机完成外业飞行,得到惯性导航数据和激光数据。在 Inertial Explorer 软件中利用基站数据和惯性导航数据进行姿态解算,得到飞行姿态数据(POS)。然后使用 Li-Acquire 软件,通过无人机飞行姿态解算激光数据,生成 las 格式表示的点云数据^[20],从而得到 LiDAR 点

云模型(图 6)。无人机扫描覆盖面积约为 40 km²,激光测量探测数据 650 万个点云。原始数据虽包含三维坐标信息,但无法自动划分属性,无法区分岩体点和植被点,且包含大量无用的噪点数据。因此,在应用前需进行模型数据的精度检查和点云滤波^[21]。



图 4 三维实景模型

Fig. 4 3D real scene model

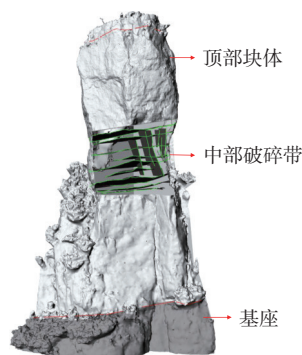


图 5 危岩体概化模型

Fig. 5 Generalized model of the dangerous rock mass

数据生成后,获取到的 LiDAR 数据需进行精度分析,检查点云密度是否达到标准。采取抽样检查岩体表面点密度分布,通过 cloud compare 软件中 compute geometric features 功能设置最邻近点的球域半径计算表面密度,测得点云平均密度为 20 ~ 30 个/m²,平均点间距为 0.2 m,满足测绘行业标准^[22]。

在通过 LiDAR 扫描目标物体时,产生非目标物体的噪点主要为植被噪点。由于研究区植被较为稀少,选取经典不规则三角网渐进加密算法对 LiDAR 点云数据进行处理^[23]。植被在 x 或 y 轴方向上比相邻岩体表面点大 1 ~ 2 m,因此可进行平面上的划分提取。但在一些低矮的灌木处,需要在 cloud compare 中导入 LiDAR 点云进行手动去除。为保证滤波效果,可在基座植被处进行裁剪,分区滤波。植被点云滤波分类后,能隐藏植被展现出岩体表面纹理特征,根据调查

需求对模型进行旋转、缩放、裁切、计算,进行危岩体的工程地质特征提取。

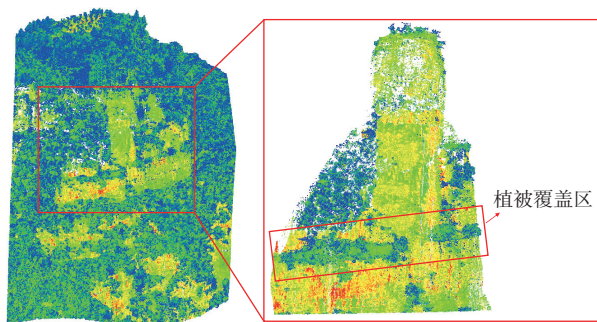


图6 LiDAR 点云

Fig. 6 LiDAR point cloud

3 高陡危岩体工程地质特征提取及稳定性分析

贴近摄影测量可建立高精度表面模型,但无法揭示植被下岩体面貌,LiDAR 激光可穿透植被,但是无法探查岩体裂隙等细部结构,将两模型互补可以挖掘更丰富的岩体信息。由于模型均为 CGCS2000 地理坐标系,并包含空间几何特征信息^[24],因此提取点云模型中任意点的坐标位置,可以进行尺寸测量。同时配准重合后的模型可互为参照,在进行测量时选取相同点位进行对比印证,可降低测量的误差和随机性,以此为基础进行危岩体的工程地质特征提取。

3.1 危岩体规模及结构特征

在 cloud compare 中导入 las 格式的三维实景模型,观察到危岩体物质组成主要为薄层-中厚层状灰岩,立面形态呈柱状,角度近乎直立,分布高程在 732 ~ 785 m,高约 53 m,平均厚约 20 m,平均宽度约 19 m。危岩体体积约 20 140 m³,前缘存在高陡临空面,易产生高位大体积崩塌。在危岩中部存在破碎带,表面剥落掉块较为严重。基座处存在大量植被,植被的根劈作用加剧了危岩体裂隙发育。

危岩体结构主要受裂隙、卸荷带等因素的控制。研究区危岩体主要有层面裂隙、构造裂隙和卸荷裂隙,主要发育在危岩体顶部和基座处,危岩中间主体部分裂隙露头较少,整体性较强(图7、图8)。

层面裂隙主要发育在危岩体顶部和中部。如危岩体中部裂隙 L2,横向层面裂隙发育密集,最长达 12 m,张开 0.5 ~ 5.0 cm,贯穿整个岩层面。裂面形态弯曲,与上部纵向裂隙相交,将岩体切割,多见孔洞与掉块。

构造裂隙发育密集处集中于危岩体的底部上游

侧,如 L3,呈纵向分布,延伸长度最长 30 m,从底部往上延伸,与 L2 交切后继续向上贯通,张开 0.5 ~ 5.0 cm,裂面形态平直。

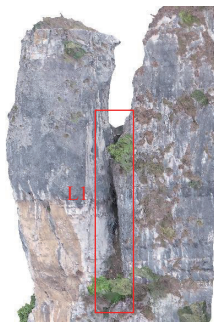


图7 危岩体侧视图

Fig. 7 Side view of the dangerous rock mass

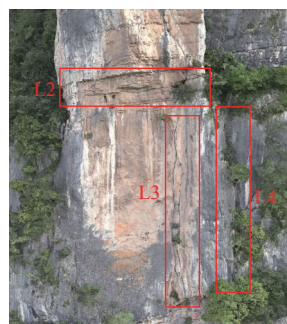


图8 危岩体正视图

Fig. 8 Front view of the dangerous rock mass

卸荷裂隙是在构造裂隙基础上,在自身重力作用下发育而成的,危岩主要发育后缘主控裂隙 L1 和 L4 两组。其中 L1 贯通深度达 17.5 m,张开 5 ~ 40 cm。L4 贯通深度达 18.5 m,张开 1 ~ 10 cm,多为块石土充填。这两组裂隙不断扩大、延伸,与层面、坡面相互作用将岩体切割支解,形成危岩。

3.2 结构面信息提取

危岩体主要由 5 条大型结构面控制,分别为:下游侧边界、上游侧边界、崖壁临空面、后缘面和破碎层面。利用平面裁切工具对危岩体进行切割分离,得到危岩单体模型,方便进行全方位的细节探查(图9)。

在结构面选取时,红色点为岩体结构面出露特征点。选取特征点平面内点云样本,根据 1.1 节所述方法,危岩体 5 条结构面的产状计算结果如图 10 所示。

在危岩体破碎层面和后缘结构面共同作用下,岩体易发生以两组结构面交线为转轴的倾倒变形破坏。陡倾的层状岩体在自重弯矩下,于前缘向临空面方向弯曲,岩体后缘出现拉裂缝。由于危岩体坡角较陡,在发生弯曲变形时前缘及上部破碎带会局部崩

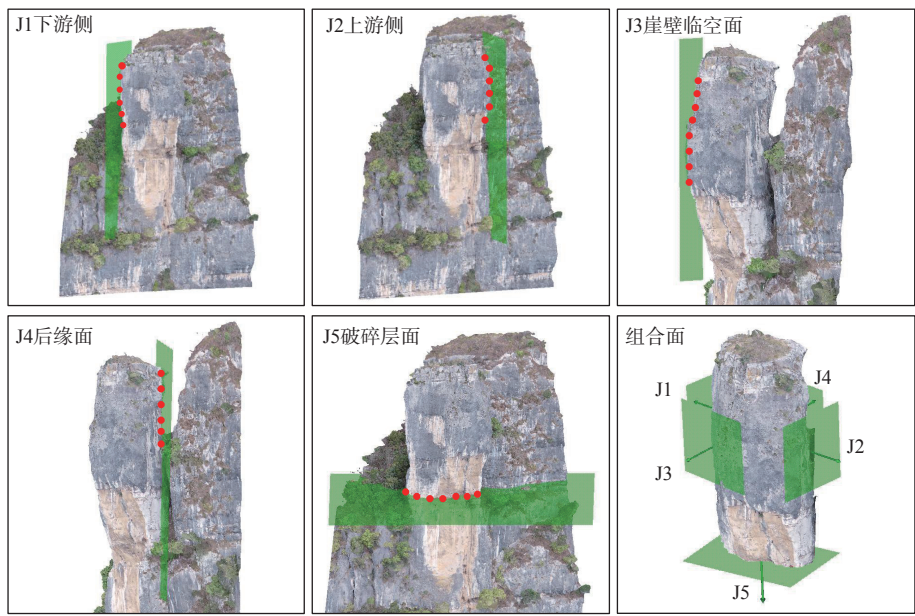


图 9 结构面划分

Fig. 9 Structural plane division

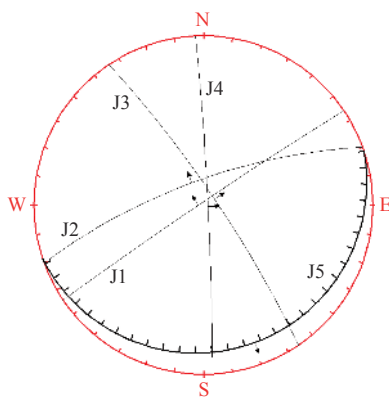


图 10 赤平投影图

Fig. 10 Stereographic projection

落,在弯曲发展到一定阶段后层面折裂、压碎,危岩体发生转动,导致倾倒式崩塌。

3.3 软弱层识别

对三维点云模型进行目视解译,探查发现植被主要发育在基座处,危岩体顶部存在少量植被。基座处的软弱层发育状况是评判危岩体稳定的关键^[25],需进行更精细的点云剖面解译,定量获取软弱层的厚度、深度等几何形态信息。

基座处的植被覆盖区主要存在 3 处软弱层,分别为目标区域 1、目标区域 2 和目标区域 3(图 11)。区域 1 和区域 2 位于危岩体上游侧,植被稀疏,仅有两株孤立的灌木。通过 cloud compare 的 point picking 功能,选取两个点,可以计算出点云之间的相对距离,从而得到岩体凹腔深度和宽度范围信息。区域 1 和区域 2 凹腔区域宽度为 8~9 m,植被处岩体存在 0.5 m 的凹腔。目标区域 3 宽度达 27.30 m,植被下凹腔最深

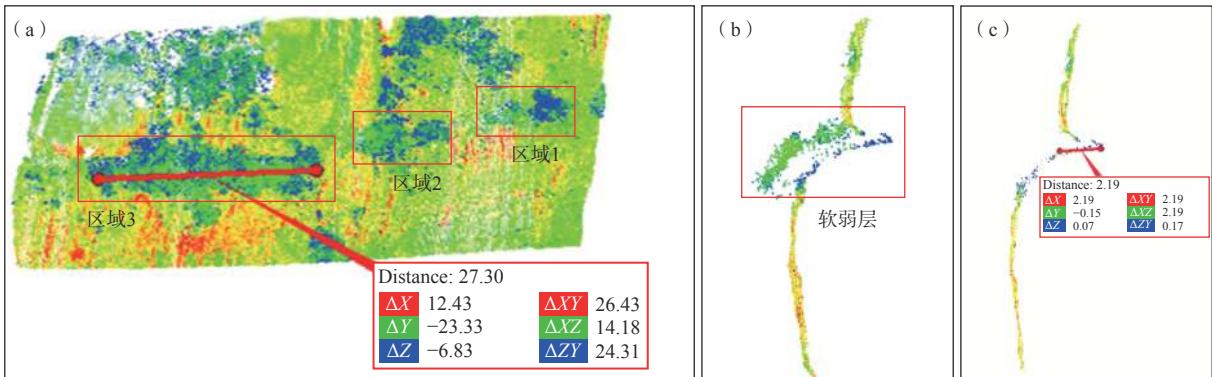


图 11 软弱层发育图

Fig. 11 Development diagram of weak layer

处达 2.19 m。凹腔夹角为 26°, 凹腔底部岩层面存在 8° 的倾角, 使上部危岩体有向外倾倒的趋势。

3.4 稳定性分析

根据分析, 危岩体主要出现的破坏模式为: 危岩体在自重应力、降雨及风化等合力作用下, 基座岩体强度不断降低, 软弱层不断发育贯通后基座岩体被压碎, 危岩体整体发生倾倒。故以后缘裂隙和基座层面为界, 进行整体稳定性计算^[26]。

参考三峡库区高陡危岩体的基本计算工况, 结合老鼠错危岩的实际情况, 采用两种工况进行计算(表 1)。

表 1 计算工况
Table 1 Calculation conditions

工况	受力情况
天然工况	自重
暴雨工况	自重+强降雨

由于危岩体基座处于 175 水位线以上, 水位变动对危岩体基座不产生影响。天然工况计算时考虑自重, 不考虑裂隙水压力; 暴雨工况按 50 年一遇 5 日暴雨进行计算, 考虑危岩自重和暴雨时裂隙水压力, 裂隙水压力参照《三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求》的有关规定, 取裂隙深度的 1/3 ~ 1/2。

按《三峡库区地质灾害防治工程地质勘察技术要求》提供的计算式进行计算。对危岩体的计算采用倾倒式破坏模式, 危岩体重心在倾覆点之内(图 12)。计

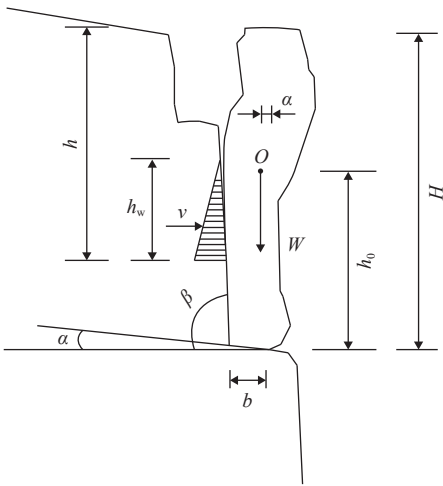


图 12 稳定性计算模式示意图
Fig. 12 Stability calculation mode

注: H ——岩体高度/m; W ——危岩体自重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$); h ——后缘裂隙深度/m; h_w ——后缘裂隙充水高度/m; α ——基座岩层倾角/(°); β ——后缘裂隙倾角/(°); v ——裂隙水压力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$); a ——危岩体重心到倾覆点的水平距离/m; b ——危岩体后缘裂隙到倾覆点的水平距离/m; h_0 ——危岩体重心到倾覆点的垂直距离/m。

算结果显示, 天然工况稳定性系数为 1.375, 为基本稳定状态, 暴雨工况稳定性系数为 1.01, 为欠稳定状态。

在构造裂隙切割和岩体自重影响下, 危岩体的卸荷裂隙不断加宽加深, 部分卸荷裂隙基本贯穿, 仅局部未脱离母体。卸荷裂隙带的形成, 为危岩体的时效变形破坏创造了条件。由于卸荷作用, 危岩体产生卸荷回弹效应, 陡倾角裂隙进一步扩容, 形成卸荷裂隙带, 此过程是一个缓慢的塑性-弹性-塑性变形破坏过程^[27]。同时, 在危岩体基座处, 树木的植被根劈作用使危岩体裂隙发育, 原有裂隙加宽加深, 多处分布局部范围的凹腔。危岩体重心位移将会偏离出凹岩腔之外, 极易发生倾倒崩塌。目前危岩处于基本稳定状态, 随着时间的推移, 在风化、震动等外力作用下, 特别是受强降雨影响后, 危岩体处于欠稳定状态^[28]。

4 结论

(1) 基于三维实景模型测得危岩体高度在 732 ~ 785 m, 高约 53 m, 平均厚约 20 m, 平均厚度约 19 m。根据出露迹线假定后缘破裂面, 计算得危岩体体积约为 20 140 m^3 , 属于大型危岩体。应用最小二乘法拟合特征点云, 可算出危岩体控制结构面产状, 结合赤平投影图分析出岩体易发生以两组结构面交线为转轴的倾倒式崩塌。

(2) 通过 LiDAR 点云模型可以直观展现软弱层发育状况, 发现基座处主要存在 3 处软弱层, 测量得软弱层最宽达 27.30 m, 沿坡面纵向截取剖面并去噪后, 探查得内部凹腔最深达 2.19 m, 凹腔夹角为 28°, 下部岩层存在 8° 的倾角, 危岩体有向外倾倒的趋势。

(3) 将提取的工程地质特征代入三峡库区危岩体计算式, 得到在自然工况下危岩体稳定性系数为 1.375, 处于稳定状态。暴雨工况下危岩体工况稳定性系数为 1.01, 处于欠稳定状态, 会威胁到长江航运安全, 建议对危岩体进行治理。

(4) 贴近摄影测量和 LiDAR 技术相融合对危岩体的调查有较好的互补性, 较其他单一遥感勘察获取的数据更全面。所构建的危岩体调查体系对于被植被覆盖的高陡危岩体也具有较好适用性。在危岩体参数充足的情况下, 可以画出更贴合实际的计算模式示意图, 有利于提高稳定性计算的准确性。

参考文献 (References) :

[1] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议 [J]. 武汉大学学

- 报(信息科学版), 2019, 44(7): 949 – 956. [GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 949 – 956. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄波林, 殷跃平, 李滨, 等. 柱状危岩体坐落式崩塌产生涌浪的简化数值模型与校验 [J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2269 – 2278. [HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, et al. Simplified numerical model and verification for the impulse wave generated by situated collapse of a dangerous columnar rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2269 – 2278. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957 – 966. [XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957 – 966. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 何佳男. 贴近摄影测量及其关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019. [HE Jianan. Nap-of-the-Object Photogrammetry and Its Key Techniques[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [5] WANG Wei, ZHAO Wenbo, CHAI Bo, et al. Discontinuity interpretation and identification of potential rockfalls for high-steep slopes based on UAV nap-of-the-object photogrammetry[J]. Computers mp; Geosciences, 2022, 166: 105191.
- [6] 梁京涛, 铁永波, 赵聪, 等. 基于贴近摄影测量技术的高陡崩塌早期识别技术方法研究 [J]. 中国地质调查, 2020, 7(5): 107 – 113. [LIANG Jingtao, TIE Yongbo, ZHAO Cong, et al. Technology and method research on the early detection of high-level collapse based on the nap-of-the-object photography[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(5): 107 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 姚富潭, 吴明堂, 董秀军, 等. 基于贴近摄影测量技术的高陡危岩体结构面调查方法 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(2): 218 – 228. [YAO Futan, WU Mingtang, DONG Xiujun, et al. Investigation method of discontinuity in high and steep dangerous rock mass based on nap of the object photogrammetry[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2023, 50(2): 218 – 228. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 贾虎军, 王立娟, 范冬丽. 无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 60 – 65. [JIA Hujun, WANG Lijuan, FAN Dongli. The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 60 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈洁, 高子弘, 王珊珊, 等. 三峡库区航空遥感地质调查技术发展综述 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 1 – 10. [CHEN Jie, GAO Zihong, WANG Shanshan, et al. A review on the development of aerial remote sensing geological survey technology in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(2): 1 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [10] GUILLAUME A S, LEEMPOEL K, ROCHAT E, et al. Multiscale very high resolution topographic models in alpine ecology: Pros and cons of airborne LiDAR and drone-based stereo-photogrammetry technologies[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1588.
- [11] ABU DABOUS S, AL-RUZOUQ R, LLORT D. Three-dimensional modeling and defect quantification of existing concrete bridges based on photogrammetry and computer aided design[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2023, 14(12): 102231.
- [12] 贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用 [J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1130 – 1136. [JIA Shuguang, JIN Aibing, ZHAO Yiqing. Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1130 – 1136. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LI Xiaolu, LIU Chang, WANG Zining, et al. Airborne LiDAR: State-of-the-art of system design, technology and application[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(3): 032002.
- [14] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 – 110.
- [15] 宣程强, 章杨松, 许文涛. 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 75 – 83. [XUAN Chengqiang, ZHANG Yangsong, XU

- Wentao. Extraction of the discontinuity orientation from a digital surface model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 75 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [16] DEROSE R C, GOMEZ B, MARDEN M, et al. Gully erosion in Mangatu Forest, New Zealand, estimated from digital elevation models[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(11): 1045 – 1053.
- [17] 吴秀坤, 谭礼金, 吴本林, 等. 遥感技术在地质灾害调查、监测和防治中的应用 [J]. *工程技术研究*, 2021, 6(3): 103 – 104. [WU Xiukun, TAN Lijin, WU Benlin, et al. Application of remote sensing technology in geological disaster investigation, monitoring and prevention[J]. *Engineering and Technological Research*, 2021, 6(3): 103 – 104. (in Chinese)]
- [18] 徐画, 陈建平, 张权平, 等. 无人机点云数据的危岩体结构信息提取 [J]. *测绘科学*, 2021, 46(7): 137 – 144. [XU Hua, CHEN Jianping, ZHANG Quanping, et al. Application of UAV photogrammetry in investigation of high and steep dangerous rock mass[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(7): 137 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李长青, 曹明兰, 李亚东, 等. 低空无人机航测露天矿三维重构方法与试验 [J]. *测绘通报*, 2018(3): 89 – 92. [LI Changqing, CAO Minglan, LI Yadong, et al. 3D reconstruction method and experiment of aerial survey of low-altitude uav for open-pit mine[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(3): 89 – 92. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 邵延秀, 张波, 邹小波, 等. 采用无人机载 LiDAR 进行快速地质调查实践 [J]. *地震地质*, 2017, 39(6): 1185 – 1197. [SHAO Yanxiu, ZHANG Bo, ZOU Xiaobo, et al. Application of uavls to rapid geological surveys[J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(6): 1185 – 1197. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 党杰, 董吉, 何松标, 等. 机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(4): 106 – 113. [DANG Jie, DONG Ji, HE Songbiao, et al. Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(4): 106 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 数字航空摄影测量 空中三角测量规范: GB/T 23236—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for aerotriangulation of digital aerophotogrammetry: GB/T 23236—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)]
- [23] DU Yixin, WAN Luhe, LI Xiaoyi, et al. High-precision DEM extraction by region segmentation-based progressive triangulation encryption filtering[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(6): 415.
- [24] LI Wenyu. Application of multimedia tilt photogrammetry technology based on unmanned aerial vehicle in geological survey[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022: 4616119.
- [25] 郭健. 库水位波动下塔柱状危岩体失稳过程研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021. [GUO Jian. Research on the Instability Process of Tower Rocks under the Fluctuation Levels of Water Reservoirs[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 胡刘洋, 张鹏, 黄波林. 三峡库区消落带岩体劣化下危岩体长期变形破坏机理——以冠木岭为例 [J]. *工程地质学报*, 2023, 31(6): 1891 – 1900. [HU Liuyang, ZHANG Peng, HUANG Bolin. Long-term deformation and failure mechanism of dangerous rock mass in water-level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir Area: A case study of guanmulin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023, 31(6): 1891 – 1900. (in Chinese with English abstract)]
- [27] XIA Yuelin, FENG Xiating, YANG Chengxiang, et al. Mechanism of excavation-induced cracking of the protective layer of a rock bench in a large underground powerhouse under high tectonic stress[J]. *Engineering Geology*, 2023, 312: 106951.
- [28] 铁永波, 徐伟, 梁京涛, 等. 川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 129 – 136. [TIE Yongbo, XU Wei, LIANG Jingtao, et al. Characteristics of Kazila Mountain landslide and its mitigation measures on the Sichuan-Tibet Railway[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 129 – 136. (in Chinese with English abstract)]